

УДК 621.923

Л.А. Петрусенко, В.С. Антонюк, д-р техн. наук, Киев, Украина

АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВРЕЗАНИИ

Проведен анализ работ по исследованиям влияния переходных процессов врезания на прочность твердосплавного лезвийного режущего инструмента. Обосновано отсутствие предпосылок для «подскоков сил резания» при врезании.

Для объяснения причин хрупкого разрушения твердосплавного режущего инструмента рассмотрены этапы переходного процесса при врезании и проведен анализ уровня напряжений, возникающих в «опасной зоне» передней поверхности инструмента.

Доказана возможность превышения уровня напряжений в опасной зоне в момент врезания относительно установившегося периода резания за счёт неблагоприятного направления действия силы резания и меньшего расстояния от вершины клина до «опасной зоны» передней поверхности режущего инструмента.

Ключевые слова: твердосплавный режущий инструмент, прерывистое резание, врезание, хрупкая прочность инструмента, уровень напряжений

Проведено аналіз робіт з досліджень впливу перехідних процесів врізання на міцність твердосплавного лезового різального інструменту. Обґрунтовано відсутність передумов для «підскоку сил різання» при врізання.

Для пояснення причин крихкого руйнування твердосплавного різального інструменту розглянуті етапи перехідного процесу при врізання і проведено аналіз рівня напружень, що виникають в «небезпечній зоні» передньої поверхні інструменту.

Доведено можливість перевищення рівня напружень в «небезпечній зоні» в момент врізання щодо сталого періоду різання за рахунок несприятливого напрямку дії сили різання і меншої відстані від вершини клина до «небезпечної зони» передньої поверхні різального інструмента.

Ключові слова: твердосплавний різальний інструмент, переривчасте різання, врізання, крихка міцність інструменту, рівень напружень.

This work devoted to studies of the transient plowing influence processes on the carbide cutting strength tools is carried out. The absence prerequisites for the "jumping cutting forces" during insertion is grounded.

To explain the brittle fracture causes of carbide cutting tool, the stages of transient process during the incision are considered and the stress level occurs in "dangerous zone" of front surface tool is analyzed.

The possibility exceeding the level of stresses in danger zone at the moment of incision with respect to the steady-state cutting period is proved due to the unfavorable cutting force direction and shorter distance from the top of wedge to "dangerous zone" of the front surface.

Key words: carbide cutting tool, intermittent cutting, cutting, brittle tool strength, stress level

Введение

Применение твёрдых сплавов в качестве инструментального материала для изготовления лезвийного режущего инструмента позволило многократно повысить режимы резания и эффективность обработки деталей, а также дало

возможность обработки заготовок из новых высокопрочных материалов. В то же время, это привело к появлению нового вида отказа работоспособности инструмента, не характерного для применявшегося ранее инструмента, изготовленного из быстрорежущих сталей – хрупкому разрушению режущей части в виде сколов и выкрашиваний. Такие разрушения могут происходить задолго до достижения предельного износа инструмента и они связаны с более низким сопротивлением твёрдых сплавов растягивающим напряжениям, возникающим в процессе резания [1, 2].

Эти свойства твердосплавного инструмента проявляются при черновой обработке неравномерного припуска и, особенно, на операциях прерывистого резания (строгание, фрезерование, зубообработка и др.). При этом стойкость твердосплавного инструмента при прерывистом резании оказывается значительно ниже, чем при непрерывном резании (например, точении).

Снижение работоспособности инструмента, работающего в условиях прерывистого резания, объясняется цикличностью возникающих механических и тепловых нагрузок на режущий инструмент, а также наличием переходных процессов при врезании и выходе инструмента. Несмотря на большое количество опубликованных работ по прерывистому резанию, механизм переходных процессов изучен недостаточно, а объяснения причин разрушения режущей части инструмента при врезании носят принципиально противоречивый характер [3 – 5].

Большинство исследований процесса врезания направлено на изучение динамики изменения величины главной составляющей силы резания P_z , а также определению предельной толщины среза («ломающей подачи») при прерывистом и непрерывном резании. Многими авторами были предложены формулировки: «удар при врезании», «всплеск силы резания», «динамическая сила резания» и т.п. [6, 7].

Однако, в ряде исследований переходного процесса врезания авторы отмечали плавный рост составляющей силы резания P_z от нуля до величины установившегося резания, а также указывали на отсутствие физических предпосылок для «всплесков» сил резания в этот момент [4, 8, 9].

Получаемые при использовании тензометрических динамометров «всплески» электрических сигналов на осциллограммах в момент врезания объясняются не «подскоками» силы резания, а реакцией упругого звена динамометра на быстропротекающий, неэкстремальный рост силы резания в переходной период. Анализ исследований динамики сил резания при врезании и обоснование отсутствия «всплеска» сил резания приведены в работе [10].

Целью настоящей работы является изучение факторов, влияющих на хрупкое разрушение режущей части инструмента в момент врезания.

Основная часть. В исследованиях хрупкого разрушения твердосплавного инструмента установлено, что величина предельной

толщины среза a_{np} , при прерывистом резании в 1,3...1,7 раз ниже, чем при точении, а разрушение режущего клина происходит только в момент врезания инструмента в заготовку. Если же в период врезания разрушение не происходит, то после наступления установившегося процесса резания, такое разрушение не наблюдается. Характер разрушения режущего клина при врезании указывает на возникновение растягивающих напряжений, опасных для режущего инструмента из твёрдых сплавов [1, 7].

Поэтому, для установления причин хрупкого разрушения твердосплавного инструмента при врезании, кроме изучения характера изменения сил резания при врезании, необходим расчёт величин напряжений, возникающих в опасной зоне передней поверхности инструмента в этот момент, а также определение факторов, влияющих на уровень этих напряжений [11].

Особенности переходных процессов при врезании. Наличие переходных процессов врезания часто связывают только с операциями прерывистого резания. Но переходной процесс врезания существует при любом виде обработки резанием, в том числе и точении.

При этом следует различать два принципиально разных типа переходных процессов:

Тип I. В момент касания режущего клина и срезаемого слоя (t_0) толщина среза имеет нулевую величину, а максимальная, заданная режимами резания, толщина среза (a) достигается через определённый промежуток времени (t_{ycm}).

Для точения период достижения максимального значения силы резания соответствует времени одного оборота детали, а длина пути резания равна длине окружности обрабатываемой поверхности. Такой же тип процесса врезания наблюдается и при встречном цилиндрическом фрезеровании (рис. 1. а).

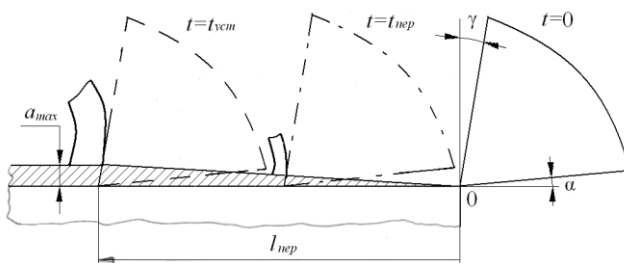


Рисунок 1 – Схема переходного процесса при встречном цилиндрическом фрезеровании (тип I)

Тут II. В момент касання режущего клина и заготовки площадь контакта между ними достигает заданного режимами резания значения.

При этом происходят быстропротекающие процессы, определяющие нормальные усилия на переднюю поверхность инструмента, а затем, после определённого периода времени ($t_{пер}$), начинается движение срезаемого слоя (стружки), формирование зоны контакта, повышение температуры резания и рост силы трения до уровня установившегося процесса ($t_{уст}$).

Такой тип врезания характерен для операций строгания, попутного и торцевого фрезерования (рис. 1.б).

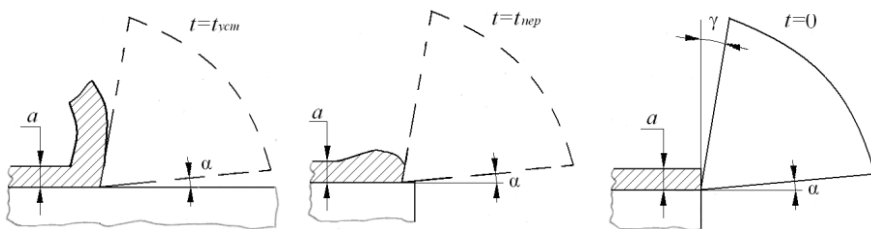


Рисунок 2 – Схема переходного процесса при попутном и торцевом фрезеровании (тип II)

Различие между первым и вторым типами переходных процессов врезания заключается в последовательности формирования нормальных и тангенциальных усилий на передней поверхности, а также в их продолжительности.

Установлено, что область растягивающих напряжений начинается в конце зоны контакта инструмента, максимальный уровень которых возникает в «опасной зоне» передней поверхности, расположенной на расстоянии от вершины, равной 2...2,5 длины контакта [2, 11].

Для расчётов напряжений возникающих за пределами зоны контакта можно использовать известный принцип Сен-Венана – замена фактических распределённых контактных нагрузок на сосредоточенную силу резания P , приложенную к вершине режущего угла.

В работе [12] предложено преобразование формулы А.И. Бетанели [1] для расчета напряжений в режущем клине инструмента к виду:

$$\sigma_1 = \frac{K_z P_z - K_y P_y}{br} \quad (1)$$

где K_z , K_y – коэффициенты; P_z , P_y – составляющие силы резания; b – ширина среза; r – расстояние от вершины до расчётной точки передней поверхности.

Коэффициенты K_z и K_y постоянны при заданных углах режущего клина γ и α , рассчитаны и приведены в работе [13].

Как видно из формулы 1, для расчёта напряжений в опасной зоне необходимо иметь значения 2-х составляющих силы резания – P_z и P_y . При этом уровень напряжений определяется не только от величиной равнодействующей силы резания, но и углом действия этой силы, ω .

Причём фактор направления вектора равнодействующей ($\tan \omega = P_y/P_z$) может иметь решающее значение при определении уровня напряжений [13, 14].

Предложенная схема переходного процесса врезания (тип II, рис.1,б) предполагает реальное «отставание» процессов трения в зоне контакта и, соответственно, больший период времени роста составляющей силы резания P_y до уровня установившегося процесса. Таким образом при врезании величина составляющей силы резания P_y меньше чем при установившемся резании. Но, согласно формуле 1, чем меньше величина P_y (при установившемся составляющей силы резания P_z), тем выше уровень возникающих напряжений.

Это подтверждается расчётами уровней напряжений по данным экспериментов с одновременным измерением величин составляющих P_z и P_y при врезании [15].

Поскольку величина составляющей силы резания P_y , в основном, определяется силами трения в зоне контакта на передней поверхности, рассмотрим особенности процессов, происходящих в переходной период врезания и их влияние на величины составляющих силы резания.

Для расчетов величины угла действия ω и составляющей силы резания P_y используем зависимость из работы [16]:

$$\beta_{тр} = \omega + \gamma,$$

где $\beta_{тр}$ - угол трения, $\tan \beta_{тр} = \mu_{тр}$ (средний коэффициент трения); ω - угол действия силы резания; γ - передний угол режущего клина.

Переходной период врезания режущего инструмента состоит из следующих этапов (рис. 3):

I. Внедрение режущего клина в заготовку, без снятия стружки.

Величина нормальных усилий и составляющей силы резания P_z растут до установившейся величины (P_z равно 100 ед. силы). С

резаемый слой удерживается в контакте с передней поверхностью силами трения покоя. Условно принимаем $\mu_{тр} = 0,35$, а передний угол $\gamma = 10^0$.

Тогда, рассчитав угол трения $\beta_{тр}$ и угол действия ω , получим величину $P_y = 18$ ед. (рис. 3, период времени «0 – I»)

II. Давление поступающего в зону резания срезаемого слоя заготовки приводит к началу движения стружки по передней поверхности клина.

Коэффициент трения снижается. Примем $\mu_{тр} = 0,3$, тогда расчетная величина составляющей $P_y = 12$ ед (рис. 3, период времени «I – II»)

III. В зоне контакта с ростом температуры начинается адгезионное взаимодействие и развивается контактное пластическое течение. За счёт адгезионной составляющей средний коэффициент трения μ_{cp} и величина составляющей P_y возрастают до показателей установившегося процесса резания.

Примем коэффициент трения для установившегося резания указывается значение $\mu_{cp} = 0,5$. При этом величина составляющей силы резания $P_y = 30$ ед. (рис. 3, период времени «II – III»).

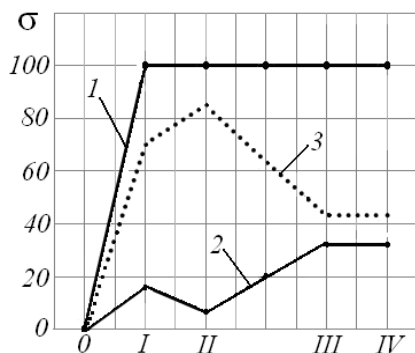


Рисунок 3 – Зависимость напряжений на передней поверхности инструмента в период врезания:

- 1 – составляющая силы резания P_z ;
- 2 – составляющая силы резания P_y ;
- 3 – расчётный уровень напряжений

Поэтому переходной период врезания можно считать полностью законченным после завершения всех вышеперечисленных этапов (рис. 3, период времени «III – IV»), а не только после выхода величины P_z на уровень установившегося резания.

По значениям составляющих P_y и P_z (рис.3, линии 1 и 2) по методике, приведенной в работе [13] выполнены расчёты величин напряжений на передней поверхности (рис. 3, линия 3) для каждого из этапов переходного периода врезания.

Как видно из рис. 3, за счёт меньшей величины составляющей силы P_y расчётный уровень напряжений на 85% выше, чем при установившемся резании (при равных величинах составляющей P_z).

Кроме того, расстояние « r » (формула 1) от вершины клина до опасной точки в переходной момент врезания намного ниже (до 2 раз), чем при установившемся резании.

Но, согласно формуле 1, величина растягивающих напряжений обратно пропорциональна этому расстоянию. В результате, за счёт сочетания факторов – направление действия силы резания и меньшая длина зоны контакта при врезании возникает экстремальное (>2 -х раз) превышение уровня напряжений в опасной зоне передней поверхности инструмента.

Для подтверждения предложенной схемы влияния различных факторов на величину напряжений при врезании, рассмотрим рис. 4 на котором приведены корни стружки в период врезания (а) и при установившемся резании (б) [17].

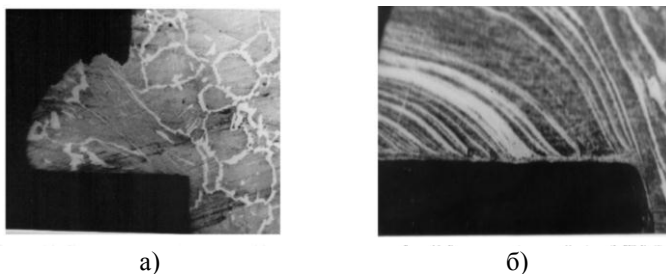


Рисунок 4 – Корень стружки
в период врезания и при установившемся резании [17]
(сталь 45 – ВК8; $V = 60$ м/мин)

Из рис. 3 видно, что при врезании (а) процесс трения проходит по законам внешнего трения (внедрение пуансона), при этом средний коэффициент трения $\mu_{тр}$ ниже, чем при установившемся резании (б), когда происходит значительная деформация слоёв стружки, прилегающих к зоне контакта.

Рассмотренная схема процесса врезания пррндолагает резание острозаточенным клином с плоской передней поверхностью, когда величина составляющей силы P_y и направление силы резания определяются только силами трения.

На практике, для повышения прочности режущей части, в том числе при прерывистом резании, применяют инструмент с округлённой режущей кромкой или с фаской под отрицательным переднем углом. Оптимальная величина радиуса округления кромки или ширина фаски рекомендуется в пределах $0,3 \dots 0,4$ толщины срезаемого слоя [7].

При врезании наличие округления кромки или фаски приводит к формированию нагрузок на этих участках, способствующих быстрому росту величины составляющей силы P_y и развороту вектора силы резания (увеличению угла действия ω). Этот фактор, приводит к снижению уровня напряжений и повышению прочности твердосплавного режущего инструмента при врезании.

Выводы

1. Хрупкое разрушение твердосплавного режущего инструмента в период врезания не может быть результатом «удара» или «подскоков силы резания». Удар при врезании возникает только в упругой системе привода станка.

2. Расчёты напряжений в опасной зоне передней поверхности показывают, что в момент врезания могут возникать напряжения, в 2...3 раза превышающие уровень напряжений установившегося резания.

3. Причинами этого явления являются особенности переходного процесса:

- больший период стабилизации составляющей силы резания P_y по отношению к P_z ;
- меньшая, чем при установившемся резании, длина контактной зоны и приближение «опасной зоны» к вершине режущего клина.

4. Для повышения прочности твердосплавного режущего инструмента при прерывистом резании рекомендуются методы округления режущей кромкой или выполнение фаски под отрицательным передним углом, что изменяет направление вектора силы резания и способствует снижению уровня растягивающих напряжений в «опасной зоне» передней поверхности инструмента.

Список использованной литературы: 1. Бетанели А.И. Прочность и надежность режущего инструмента : научное издание / А. И. Бетанели. – Тбилиси : Сабчота Сакартвело, 1973. – 304 с. 2. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. / В.А. Остафьев. – М.: Машиностроение. 1979. 168 с. 3. Лоладзе Т.Н. Определение напряжений в режущей части инструмента при переходных процессах. / Т.Н. Лоладзе, Г.Н. Ткемаладзе., Ф.Г. Тотчиев. – В кн.: Надежность режущего инструмента. Вып. 2, Киев-Донецк. 1975, с. 82-86. 4. Андреев Г.С. Удар при прерывистом резании //Вестник машиностроения. – 1971. – №3. – С. 65-68. 5. Симонян М.М. Развитие теоретических и технологических принципов повышения работоспособности твёрдосплавных инструментов в процессах прерывистого резания. Автореф. дисс. д.т.н., Ереван, 2013. 6. Вульф А.М. Резание металлов / А.М. Вульф Изд. 2-е. - Л.: «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1973. – 496 с. 7. Хаев Г.Л. Прочность режущего инструмента. М. Машиностроение. 1975. 167с. 8. Высокоскоростная фотосъемка начального процесса резания при обработке. / Дж. Тэ //Констр. и техн. Маш.: Тр. Амер. Общ. Инж.-механиков. М.: Мир, 1977:– №1. С.213-219. 9. Жирков А.А. Измерительно-вычислительный комплекс исследования закономерностей процессов прерывистого резания / А.А. Жирков, А.В. Катунин // Известия ОрёлГТУ. Машиностроение и приборостроение. – Орёл: ОрёлГТУ, 2003. – №3 – С. 92-94. 10. Петрусенко Л.А., Антонюк В.С. Динамика сил резания при врезании режущего инструмента // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2017/. – Вип. № 39. – С.168-175. 11. Остафьев В.А. Физические основы процесса резания. / В.А.Остафьев, В.С. Антонюк, С.П. Выслоух [и др.]; под. общ. ред. В.А. Остафьева. – Киев: изд. «Вища школа», 1976. - 136 с. 12. Ильченко Н.Я., Ковтуненко В.Е., Петрусенко Л.А. Об особенностях напряжённого состояния режущей части инструмента при прерывистом резании // Резание и инструмент. Харьков, 1979. – №22 – С.72-77. 13. Петрусенко Л.А., Антонюк В.С. Расчёт напряжений, возникающих в опасной зоне лезвийной части режущего инструмента / Л.А. Петрусенко, В.С. Антонюк // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: Машинобудування – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – Вип.77. – С. 147-156. 14. Петрусенко Л.А., Антонюк В.С. Расчётный метод определения геометрических параметров

твердосплавного режущего инструмента. / Л.А.Петрусенко, В.С. Антонюк // Вісник НТУ «ХПІ» Серія Технології в машинобудування Харків: НТУ «ХПІ», №17 (1239). 2017. – С. 54-59.

15. Хандошко А.В., Тимошенко А.А., Петрусенко Л.А. Анализ факторов, вызывающих хрупкое разрушение твердосплавного режущего инструмента. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вип. № 38 2016 С. 175-183.

16. Основы теории резания материалов: Учебник / Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И. и др. Под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. – 2-е изд. – Харьков: 2013. – 534 с.

17. Повышение эффективности обработки резанием. Коллективная монография. Под ред. А.В. Киричека Изд. дом «Спектр». Москва. 2012. – 307с.

Bibliography (transliterated): 1. Betaneli A.I. Prochnost' i nadezhnost' rezhushhego instrumenta : nauchnoe izdanie / A. I. Betaneli. – Tbilisi : Sabchota Sakartvelo, 1973. – 304 s. 2. Ostaf'ev V.A. Raschet dinamicheskoy prochnosti rezhushhego instrumenta. / V.A. Ostaf'ev. – M.: Mashinostroenie. 1979. 168 s. 3. Loladze T.N. Opredelenie naprjazhenij v rezhushhej chasti instrumenta pri perehodnyh procesah. / T.N. Loladze, G.N Tkemaladze., F.G. Totchiev. – V kn.: Nadezhnost' rezhushhego instrumenta. Vyp. 2, Kiev-Doneck. 1975, s. 82-86. 4. Andreev G.S. Udar pri preryvistom rezanii //Vestnik mashinostroenija.1971. – №3. – S. 65-68. 5. Simonjan M.M. Razvitie teoreticheskikh i tehnologicheskikh principov povyshenija rabotosposobnosti tvjordospлавnyh instrumentov v processah preryvistogo rezanija. Avtoref. diss. d.t.n., Erevan, 2013. 6. Vul'f A.M. Rezanie metallov / A.M. Vul'f Izd. 2-e. - L.: «Mashinostroenie» (Leningr. otd-nie), 1973. – 496 s. 7. Haet G.L. Prochnost' rezhushhego instrumenta. M. Mashinostroenie. 1975. 167s. 8. Vysokoskorosnaja fotos'emka nachal'nogo processa rezanija pri obrabotke./ Dzh. Tje //Konstr. i tehn. Mash.: Tr. Amer. Obshh. Inzh.-mekanikov. M.: Mir, 1977.: №1. S.213-219. 9. Zhirkov A. A. Izmeritel'no-vychislitel'nyj kompleks issledovaniya zakonomernostej processov preryvistogo rezanija / A.A. Zhirkov, A.V. Katunin // Izvestija OrjolGTU. Mashinostroenie i priborostroenie. – Orjol: OrjolGTU, 2003. – №3 – S. 92-94. 10. Petrusenko L.A., Antonjuk V.S. Dinamika sil rezanija pri vrezanii rezhushhego instrumenta // Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem: Zb. nauk. prac'. – Kramators'k: DDMA, 2017. – Vip. № 39. – S.168-175. - 11. Ostaf'ev V.A. Fizicheskie osnovy processa rezanija. / V.A.Ostaf'ev, V.S. Antonjuk, S.P. Vyslouh [i dr.]; pod. obshh. red. V.A. Ostaf'eva. – Kiev: izd. «Vishha shkola», 1976. – 136 s. 12. Il'chenko N.Ja., Kovtunenکو V.E., Petrusenko L.A. Ob osobennostjah naprjazhonnogo sostojanija rezhushhej chasti instrumenta pri preryvistom rezanii //Rezanie i instrument. Har'kov, 1979. – №22 – S.72-77. 13. Petrusenko L.A., Antonjuk V.S. Raschjot naprjazhenij, vznikajushhih v opasnoj zone lezviyjnoj chasti rezhushhego instrumenta / L.A. Petrusenko, V.S. Antonjuk // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu Ukraїni «Kiїvs'kij politehničnij institut»: Mashinobuduvannja – K.: NTUU «KPI», 2016. – Vip.77. – S. 147-156. 14. Petrusenko L.A., Antonjuk V.S. Raschjotnyj metod opredelenija geometricheskikh parametrov tvjordospлавного rezhushhego instrumenta. / L.A.Petrusenko, V.S. Antonjuk // Visnik NTU «HPI» Serija Tehnologії v mashinobuduvannja Har'kiv: NTU «HPI», №17 (1239). 2017.– S. 54-59. 15. Handozhko A.V., Timoshhenko A.A., Petrusenko L.A. Analiz faktorov vyzyvajushhih hrupoe razrushenie tvordospлавного rezhushhego instrumenta. // Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem Vip. № 38 2016 S. 175–183. 16. Osnovy teorii rezanija materialov: Uchebnik / Mazur N.P., Vnuков Ju.N., Grabchenko A.I. i dr. ; pod obshh. red. N.P. Mazura i A.I. Grabchenko. –2-e izd. – Har'kov : 2013. – 534 s. 17. Povyshenie jeffektivnosti obrabotki rezaniem. Kollektivnaja monografija. Pod red. A.V. Kiricheka Izd. dom «Spektr». Moskva. 2012. – 307s.